

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re application of

Akira ASAI et al.

Serial No.: 10/632,136

Group Art Unit: 2124

Filed: July 31, 2003

Examiner:

For: INTERPOLATION METHOD, APPARATUS FOR CARRYING OUT THE METHOD,
AND CONTROL PROGRAM FOR IMPLEMENTING THE METHOD

Certificate of Mailing

I hereby certify that this paper is being deposited with the
United States Postal Service as first class mail in an
envelope addressed to: Commissioner for Patents, P.O.
Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450 on:

Date: 11/04/03

By: [Signature]

Marc A. Rossi

CLAIM FOR PRIORITY

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

The benefit of the filing date of the following prior foreign application filed in the
following country is hereby requested for the above-identified application and the priority
provided in 35 U.S.C. § 119 is hereby claimed:

JAPAN 2002 - 223145 July 31, 2002

In support of this claim, a certified copy of said original foreign application is filed
herewith. It is requested that the file of this application be marked to indicate that the
requirements of 35 U.S.C. 119 have been fulfilled and that the Patent and Trademark Office
kindly acknowledge receipt of this document.

11/04/03
Date

Attorney Docket: CANO:080

Respectfully submitted,

[Signature]
Marc A. Rossi

Registration No. 31,923

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 2 年 7 月 3 1 日
Date of Application:

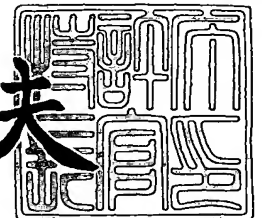
出 願 番 号 特 願 2 0 0 2 - 2 2 3 1 4 5
Application Number:
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 2 - 2 2 3 1 4 5]

出 願 人 キヤノン株式会社
Applicant(s):

2 0 0 3 年 8 月 1 8 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今 井 康 夫



【書類名】 特許願

【整理番号】 4737035

【提出日】 平成14年 7月31日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G06F 1/02

【発明の名称】 補間方法、その実行装置、及び制御プログラム

【請求項の数】 11

【発明者】

 【住所又は居所】 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社
社内

 【氏名】 浅井 朗

【発明者】

 【住所又は居所】 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キヤノン株式会社
社内

 【氏名】 松谷 茂樹

【特許出願人】

 【識別番号】 000001007

 【氏名又は名称】 キヤノン株式会社

 【代表者】 御手洗 富士夫

【代理人】

 【識別番号】 100081880

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 渡部 敏彦

 【電話番号】 03(3580)8464

【手数料の表示】

 【予納台帳番号】 007065

 【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

 【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9703713

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 補間方法、その実行装置、及び制御プログラム

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 1次元実領域上に構成された1次元構造格子と、該1次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該1次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記1次元実領域上の関数 F を定義する補間方法において、

着目する胞において、該関数 f の前進差分と後進差分の符号が異なるときには傾きをゼロとし、該前進差分と後進差分の符号が同じ場合は、その絶対値の小さい方の2倍を傾きに選び、

中心での値として前記着目する胞の中心の値 f を持ち、該傾きを持つ1次関数によって、該胞で定まる1次元実領域の部分領域上での該関数 F の値を定めることを特徴とする補間方法。

【請求項 2】 移流型微分方程式の数値解法における補間方法として用いることを特徴とする請求項 1 記載の補間方法。

【請求項 3】 2次元実領域上の構成された2次元構造格子と、該2次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該2次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記2次元実領域上の関数 F を定義する補間方法において、

着目する胞を胞甲とし、

胞甲の各辺を東西あるいは南北にそれぞれ合わせた際に東西南北方向に隣合う4胞に対して、前記胞甲の中心点と各4胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の2倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 東西と前記 Df 南北の傾きを有し前記胞甲の中心において胞甲の中心での前記関数 f の値を持つ平面を構成してそれを平面乙とし、

前記胞甲の北東方向の格子点における前記平面乙の値が胞甲の中心の値より大

きい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での f の値を超えないように Df 東西及び Df 南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更し、

胞甲の北東方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での f の値を下回らないように前記 Df 東西及び前記 Df 南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更し、

得られた平面乙に対して、該北東方向の格子点に対して行った操作を、北西方向の格子点、南西方向の格子点及び南東方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、該平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数 F として定める事を特徴する補間方法。

【請求項4】 3次元実領域上の構成された3次元構造格子と、該3次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該3次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記3次元実領域上の関数 F を定義する補間方法において、

着目する胞を胞甲とし、

胞甲の各辺を東西、南北あるいは天地にそれぞれ合わせた際に、東西南北天地方向に隣合う6胞に対して、前記胞甲の中心点と各6胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の2倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北、 Df 天、 Df 地とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 天と前記 Df 地が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 天地とし、前記 Df 東西と前記 Df 南北と前記 Df 天地の傾きを有し前記胞甲の中心における関数 f の値を通る補間関数の候補を構成してそれを平面乙とし、

前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の7胞の中心での f 値を超えないように、前記 Df 東西、前記 Df 南北及び前記 Df 天地を1以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更し、

前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の7胞の中心での f 値を下回らないように前記 Df 東西、前記 Df 南北及び前記 Df 天地を1以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更し、

得られた補間関数の候補平面乙に対して、該北東天方向の格子点に対して行った操作を、北西天方向の格子点、南西天方向の格子点、南東天方向の格子点、北東地方向の格子点、北西地方向の格子点、南西地方向の格子点、及び南東地方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数 F として定める事の特徴とする補間方法。

【請求項5】 移流型微分方程式の数値解法における補間方法として用いることを特徴とする請求項4記載の補間方法。

【請求項6】 1次元実領域上に構成された1次元構造格子と、該1次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該1次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記1次元実領域上の関数 F を定義する補間方法を実行する実行装置において、

着目する胞に対して、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が異なるときには傾きをゼロに設定し、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が同じ場合は、その絶対値の小さい方の2倍を傾きに設定する手段と、

中心での値として前記着目する胞の中心の値 f を持ち、該傾きを持つ1次関数によって、該胞で定まる1次元実領域の部分領域上での該関数 F の値を定める手段とを備えたことを特徴とする実行装置。

【請求項7】 2次元実領域上の構成された2次元構造格子と、該2次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該2次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記2次元実領域上の関数 F を定義する補間方法を実行する実行装置において、

着目する胞を胞甲とし、胞甲の各辺を東西あるいは南北にそれぞれ合わせた際に東西南北方向に隣合う4胞に対して、前記胞甲の中心点と各4胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の2倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対

値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 東西と前記 Df 南北の傾きを有し前記胞甲の中心において胞甲の中心での前記関数 f の値を持つ平面を構成してそれを平面乙とし、

前記胞甲の北東方向の格子点における前記平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での f の値を超えないように Df 東西及び Df 南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更する手段と、

胞甲の北東方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での前記関数 f の値を下回らないように前記 Df 東西及び前記 Df 南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更する手段と、

得られた平面乙に対して、該北東方向の格子点に対して行った操作を、北西方向の格子点、南西方向の格子点及び南東方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、該平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数 F として定める手段とを備えた事の特徴する実行装置。

【請求項8】 3次元実領域上の構成された3次元構造格子と、該3次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該3次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記3次元実領域上の関数 F を定義する補間方法を実行する実行装置において、

着目する胞を胞甲とし、

胞甲の各辺を東西、南北あるいは天地にそれぞれ合わせた際に、東西南北天地方向に隣合う6胞に対して、前記胞甲の中心点と各6胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の2倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北、 Df 天、 Df 地とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 天と前記 Df 地が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを D

f 天地とし、前記D f 東西と前記D f 南北と前記D f 天地の傾きを有し前記胞甲の中心における関数 f の値を通る補関関数の候補を構成してそれを平面乙とし、

前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の 7 胞の中心での f 値を超えないように、前記D f 東西、前記D f 南北及び前記D f 天地を 1 以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更する手段と、

前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の 7 胞の中心での f 値を下回らないように前記D f 東西、前記D f 南北及び前記D f 天地を 1 以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更する手段と、

得られた補関関数の候補平面乙に対して、該北東天方向の格子点に対して行った操作を、北西天方向の格子点、南西天方向の格子点、南東天方向の格子点、北東地方向の格子点、北西地方向の格子点、南西地方向の格子点、及び南東地方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補関関数Fとして定める手段とを備えた事の特徴とする実行装置。

【請求項 9】 1 次元実領域上に構成された 1 次元構造格子と、該 1 次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該 1 次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記 1 次元実領域上の関数Fを定義する補関方法を実行するためのコンピュータで実行可能な制御プログラムであって、

着目する胞に対して、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が異なる時には傾きをゼロとし、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が同じ場合は、その絶対値の小さい方の 2 倍を傾きを選び、中心での値として前記着目する胞の中心の値 f を持ち、該傾きを持つ 1 次関数によって、該胞で定まる 1 次元実領域の部分領域上での該関数Fの値を定めるような内容を有することを特徴とする制御プログラム。

【請求項 10】 2次元実領域上の構成された2次元構造格子と、該2次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該2次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記2次元実領域上の関数 F を定義する補間方法を実行するためのコンピュータで実行可能な制御プログラムであって、

着目する胞を胞甲とし、

胞甲の各辺を東西あるいは南北にそれぞれ合わせた際に東西南北方向に隣合う4胞に対して、前記胞甲の中心点と各4胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の2倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 東西と前記 Df 南北の傾きを有し前記胞甲の中心において胞甲の中心での前記関数 f の値を持つ平面を構成してそれを平面乙とし、

前記胞甲の北東方向の格子点における前記平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での f の値を超えないように Df 東西及び Df 南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更し、

胞甲の北東方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での f の値を下回らないように前記 Df 東西及び前記 Df 南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更し、

得られた平面乙に対して、該北東方向の格子点に対して行った操作を、北西方向の格子点、南西方向の格子点及び南東方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、該平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数 F として定めるような内容を有する事を特徴する制御プログラム。

【請求項 11】 3次元実領域上の構成された3次元構造格子と、該3次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該3次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、

前記 3 次元実領域上の関数 F を定義する補間方法において、

着目する胞を胞甲とし、

胞甲の各辺を東西、南北あるいは天地にそれぞれ合わせた際に、東西南北天地方向に隣合う 6 胞に対して、前記胞甲の中心点と各 6 胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の 2 倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北、 Df 天、 Df 地とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 天と前記 Df 地が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 天地とし、前記 Df 東西と前記 Df 南北と前記 Df 天地の傾きを有し前記胞甲の中心における関数 f の値を通る補関関数の候補を構成してそれを平面乙とし、

前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の 7 胞の中心での f 値を超えないように、前記 Df 東西、前記 Df 南北及び前記 Df 天地を 1 以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更し、

前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の 7 胞の中心での f 値を下回らないように前記 Df 東西、前記 Df 南北及び前記 Df 天地を 1 以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更し、

得られた補関関数の候補平面乙に対して、該北東天方向の格子点に対して行った操作を、北西天方向の格子点、南西天方向の格子点、南東天方向の格子点、北東地方向の格子点、北西地方向の格子点、南西地方向の格子点、及び南東地方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補関関数 F として定めるような内容を有する事の特徴とする制御プログラム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

流体の運動を計算機上で実現する計算流体力学などで使用される補間方法等に

関する。

【 0 0 0 2 】

【従来の技術】

流体の運動を計算機上で実現する計算流体力学は、近年大きく発展してきた。しかしながら、流体中を物体が運動する様子を表現する、あるいは、2流体あるいは多層流体の運動を表現するということは困難を伴い、様々な試みがなされている。

【 0 0 0 3 】

静止した物体に対する流体の計算は、物体の形状に応じて格子を生成するということができるため、有限要素法等の非構造格子等を利用する方法が知られている。物体を動かす場合も、その動きに応じて格子を変化させるという方法もあるが、大きな変形を伴う場合、一般に困難を生じる。

【 0 0 0 4 】

他方、スタッガード格子として知られる双対格子と格子との双対性を利用した構造格子上での差分方程式による流体方程式の近似的実現は、その安定性から信頼性が高い。このことから、物質の占有率を格子上の関数として表現し、その関数の移動を行うという考え方がある。その1つとして例えば、非圧縮性流体における流体体等法（以下VOF法と呼ぶ）を利用する方法がある。この場合は、占有率関数の移動問題が重要な技術となる。

【 0 0 0 5 】

また、圧縮性流体の場合は、様々な物の移動が重要であり、特に衝撃波の伝播等は、上記の物質、あるいは界面の運動と非常に関連している。

【 0 0 0 6 】

これらの移動を表現する方程式（移流方程式と呼ばれる）の初期値問題のことをリーマンの空気中の波動方程式の論文「Ueber die Fortpflanzung ebener Luftwellen von endlicher Schwingungsweite（Abhandlungen der Koniglichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Gottingen, 8（1860），43-65）」に因んで、リーマン問題と呼ぶ。

【 0 0 0 7 】

このリーマン問題の数値解法として、近年全変動通減法 (Total Valuation Diminishing法、以下TVD法と記す) と呼ばれる高次精度上流化スキーム、制限関数を導入する本質的非振動法 (Essentially Non-Oscillatory法、以下ENO法と記す)、保存単調上流法 (Monotone Upstream Scheme for Conservation Laws、以下MUSCL法と記す)、正值保存法 (Positively Preserving、以下PP法と記す) 等々の概念や方法が存在し、それらは独立であったり、従属であったりしている。

【0008】

本発明で取り扱うものの一つは、

$$\partial F(x, t) / \partial t = \partial C(x, t) F(x, t) / \partial x \quad \dots (1)$$

とする1次元の偏微分方程式であり、この方程式を差分化して計算を行う問題を考える。F(X, T)として、X, Tは以下離散的空間格子点及び離散時間を指すものとする。

【0009】

式(1)を解く問題に対して、上述したように、計算流体力学においては様々な計算手法が提案されている。TVD法とは、TVD条件

$$TV(F[\cdot, n]) = \sum_j |F[j+1, n] - F[j, n]| \quad \dots (2)$$

が時間発展に対して増加しないという条件、

$$TV(F[\cdot, n+1]) \leq TV(F[\cdot, n]) \quad \dots (3)$$

を満たす方法のことである。

【0010】

広い意味での保存単調上流法 (Monotone Upstream Scheme for Conservation Laws、MUSCL法と記す) は、データの再構築と近似リーマン解法との2つから構成される計算手法である。

【0011】

MUSCL法とTVD法を統合することにより、関数に不連続な飛びが存在する場合に発生する振動を除去する制限関数付き上流法が、ENO法である。

【0012】

また、データの再構築方法としては、区分的定関数で補間する方法（これを1次精度と記す）、関数を区分的線形関数で補間する方法（これを2次精度と記す）、及び区分的2次曲線で補間する方法（これを3次精度と記す）が多く使われている。

【0013】

本発明は、2次精度に関するものである。

【0014】

従来の方法における2次精度のENO法について説明を行う。上記式(1)を数値的に解く際に、区分的1次関数

$$H[I, J](x) = F(I, J) + G(I, J) x \quad \dots (4)$$

が存在しているとして差分近似解を求める方法を述べる。もしも関数 $C(I+1/2, J)$ が正であれば、

$$Q(I+1/2, J) := C(I+1/2, J)H[I, J](\Delta x/2 - C(I, J) \Delta t/2) \quad \dots (5)$$

とし、そうでなければ、

$$Q(I+1/2, J) := C(I+1/2, J)H[I+1, J](-\Delta x/2 - C(I+1, J) \Delta t/2) \quad \dots (6)$$

と定義し、

$$F(I, J+1) = F(I, J) + \Delta t (Q(I+1/2, J) - Q(I-1/2, J)) / \Delta x \quad \dots (7)$$

とすることにより、式(1)を近似的に解くことができる。

【0015】

他方、式(4)の区分的1次関数において勾配を表すスロープ関数 $G(I, J)$ は以下のように定める。

【0016】

$$G(I, J) = \Delta F(I, J) / \Delta x \quad \dots (8)$$

ここで、 $\Delta F(I, J)$ の求め方は以下に示すように、様々な定義の仕方がある。ここでは特徴的な3つの方法について述べる。

【0017】

まず、

$$Sp(I, J) := F(I+1, J) - F(I, J)$$

$$Sm(I, J) := F(I, J) - F(I-1, J)$$

… (9)

を導入する。1次元TVD制限関数として、Minmodと呼ばれるものにおいては、 $\Delta F(I, J)$ は、

$$\Delta F(I, J) = (\text{sgn}(Sp(I, J)) + \text{sgn}(Sm(I, J))) \cdot \text{Min}(|Sp(I, J)|, |Sm(I, J)|) / 2$$

… (10)

で与えられるものであり、平均制限関数と呼ばれるものでは、

$$\Delta F(I, J) = (\text{sgn}(Sp(I, J)) + \text{sgn}(Sm(I, J))) \cdot$$

$$\text{Min}((|Sp(I, J) + Sm(I, J)| / 2, 2|Sp(I, J)|, 2|Sm(I, J)|) / 2$$

… (11)

であり、Superbeeと呼ばれるものでは、

$$\Delta F(I, J) = (\text{sgn}(Sp(I, J)) + \text{sgn}(Sm(I, J))) \cdot$$

$$\text{Min}(\text{Max}(|Sp(I, J)|, |Sm(I, J)|), 2|Sp(I, J)|, 2|Sm(I, J)|) / 2$$

… (12)

であるとしている。但し、 $\text{sgn}()$ は符号関数である。つまり、その引数が正のときには1、負の時には-1を返す関数である。

【0018】

これらのことは、例えば「A. Suresh, “Positivity-Perserving Schemes in Multidimensions” SIAM J. Sci. Comput. 22, 1184-1198 (2000)」に記載されている。

【0019】

これらの補間方法で、矩形形状の関数を上記式(7)に従って移流計算した結果が図7～図9に示されている。周期的境界条件で、ステップ数100回の後の形状と、初期形状をグラフに示した。図7がMinmod、図8が平均制限関数、図9

がSuperbeeと呼ばれるものである。これらの図から明らかなように、矩形形状が激しく崩れ鈍っていることが判る。

【 0 0 2 0 】

次に、上述のような 1 次元に対するアルゴリズムを高次元に拡張したものについて説明する。ここでは、上記文献に記載されている方法について述べる。

【 0 0 2 1 】

二次元格子の上に与えられたある時間 T での関数を $F(I, J, T)$ とする。 I, J は整数であり、 2 次元の格子の各格子を指している。

【 0 0 2 2 】

この時、次の値を定義する。

$$\begin{aligned}
 V_{\min} = & \text{Min}(F(I-1, J+1, T) - F(I, J, T), F(I, J+1, T) - F(I, J, T), \\
 & F(I+1, J+1, T) - F(I, J, T), F(I-1, J, T) - F(I, J, T), \\
 & -\epsilon, F(I+1, J, T) - F(I, J, T), \\
 & F(I-1, J-1, T) - F(I, J, T), F(I, J-1, T) - F(I, J, T), \\
 & F(I+1, J-1, T) - F(I, J, T)) \\
 V_{\max} = & \text{Max}(F(I-1, J+1, T) - F(I, J, T), F(I, J+1, T) - F(I, J, T), \\
 & F(I+1, J+1, T) - F(I, J, T), F(I-1, J, T) - F(I, J, T), \\
 & \epsilon, F(I+1, J, T) - F(I, J, T), \\
 & F(I-1, J-1, T) - F(I, J, T), F(I, J-1, T) - F(I, J, T), \\
 & F(I+1, J-1, T) - F(I, J, T)) \\
 & \dots (13)
 \end{aligned}$$

また

$$\begin{aligned}
 S_x(I, J, T) &= (F(I+1, J, T) - F(I-1, J, T)) / 2 \\
 S_y(I, J, T) &= (F(I, J+1, T) - F(I, J-1, T)) / 2 \\
 &\dots (14)
 \end{aligned}$$

とする。

【 0 0 2 3 】

$$\begin{aligned}
 V &= 2 (\text{Min}(|V_{\min}|, |V_{\max}|) \\
 &\quad / (|S_x(I, J, T)| + |S_y(I, J, T)| + \epsilon))
 \end{aligned}$$

… (15)

この時、

$$G_x(I, J, T) = \text{Min}(1, V) S_x(I, J, T) / \Delta x$$

$$G_y(I, J, T) = \text{Min}(1, V) S_y(I, J, T) / \Delta y$$

… (16)

とした後に、(I, J) 格子内の補間関数 $H(I, J, T)(x, y)$ を

$$H(I, J, T)(x, y) = F(I, J, T) + G_x(I, J, T) x + G_y(I, J, T) y$$

… (17)

とするものである。

【0024】

これを利用すると、図 10 (a) に示す初期値に対して、図 10 (b) に示すような移流の計算ができることになる。

【0025】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら上記従来の補間方法では、次のような問題点があった。

【0026】

2 相の非圧縮性流体における流体体積法 (VOF 法) において、形状を如何に保持させたまま時間発展させるかという問題は、非常に大きな関心事であるにも関わらず、従来の方法では、計算ステップを経る毎に形状が崩れてなだらかになってゆく傾向があった。

【0027】

このような点から、より形状を保持できるようなような計算アルゴリズムが必須であり、そのために、一次元に対するアルゴリズムについては、上記式 (4) における補間関数をより良いものに取り替えることが必要であり、高次元に対するアルゴリズムについては、上記式 (17) における補間関数をより良いものに取り替えることが必要であった。

【0028】

本発明は上記従来の問題点に鑑み、2 相の非圧縮性流体における流体体積法 (VOF 法) において、形状をシャープに保持させたまま時間発展させることがで

きる補間方法等を提供することを目的とする。

【0029】

【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するために、本発明の第一の補間方法では、1次元実領域上に構成された1次元構造格子と、該1次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該1次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記1次元実領域上の関数 F を定義する補間方法において、着目する胞に対して、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が異なるときには傾きをゼロとし、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が同じ場合は、その絶対値の小さい方の2倍を傾きに選び、中心での値として前記着目する胞の中心の値 f を持ち、該傾きを持つ1次関数によって、該胞で定まる1次元実領域の部分領域上での該関数 F の値を定めることを特徴とする。

【0030】

本発明の第二の補間方法では、2次元実領域上の構成された2次元構造格子と、該2次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該2次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記2次元実領域上の関数 F を定義する補間方法において、着目する胞を胞甲とし、胞甲の各辺を東西あるいは南北にそれぞれ合わせた際に東西南北方向に隣合う4胞に対して、前記胞甲の中心点と各4胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の2倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 東西と前記 Df 南北の傾きを有し前記胞甲の中心において胞甲の中心での前記関数 f の値を持つ平面を構成してそれを平面乙とし、前記胞甲の北東方向の格子点における前記平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での f の値を超えないように Df 東西及び Df 南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更し、胞甲の北東方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小

さい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での f の値を下回らないように前記 Df 東西及び前記 Df 南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更し、得られた平面乙に対して、該北東方向の格子点に対して行った操作を、北西方向の格子点、南西方向の格子点及び南東方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、該平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数 F として定める事の特徴とする。

【0031】

本発明の第三の補間方法では、3次元実領域上の構成された3次元構造格子と、該3次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該3次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記3次元実領域上の関数 F を定義する補間方法において、着目する胞を胞甲とし、胞甲の各辺を東西、南北あるいは天地にそれぞれ合わせた際に、東西南北天地方向に隣合う6胞に対して、前記胞甲の中心点と各6胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の2倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北、 Df 天、 Df 地とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 天と前記 Df 地が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 天地とし、前記 Df 東西と前記 Df 南北と前記 Df 天地の傾きを有し前記胞甲の中心における関数 f の値を通る補間関数の候補を構成してそれを平面乙とし、前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の7胞の中心での f 値を超えないように、前記 Df 東西、前記 Df 南北及び前記 Df 天地を1以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更し、前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の7胞の中心での f 値を下回らないように前記 Df 東西、前記 Df 南北及び前記 Df 天地を1以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を

変更し、得られた補間関数の候補平面乙に対して、該北東天方向の格子点に対して行った操作を、北西天方向の格子点、南西天方向の格子点、南東天方向の格子点、北東地方向の格子点、北西地方向の格子点、南西地方向の格子点、及び南東地方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数Fとして定める事の特徴とする。

【0032】

本発明の第一の実行装置では、1次元実領域上に構成された1次元構造格子と、該1次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該1次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記1次元実領域上の関数Fを定義する補間方法を実行する実行装置において、着目する胞に対して、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が異なるときには傾きをゼロに設定し、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が同じ場合は、その絶対値の小さい方の2倍を傾きに設定する手段と、中心での値として前記着目する胞の中心の値 f を持ち、該傾きを持つ1次関数によって、該胞で定まる1次元実領域の部分領域上での該関数Fの値を定める手段とを備えたことを特徴とする。

【0033】

本発明の第二の実行装置では、2次元実領域上に構成された2次元構造格子と、該2次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該2次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記2次元実領域上の関数Fを定義する補間方法を実行する実行装置において、着目する胞を胞甲とし、胞甲の各辺を東西あるいは南北にそれぞれ合わせた際に東西南北方向に隣合う4胞に対して、前記胞甲の中心点と各4胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の2倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 東西と前記 Df 南北の傾きを有し前記胞甲の中心において胞甲の中心での前記関数 f の値を持つ平面を構成してそれを平面乙とし、前記胞甲の北東方向の格子点に

おける前記平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での f の値を超えないように Df 東西及び Df 南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更する手段と、胞甲の北東方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での前記関数 f の値を下回らないように前記 Df 東西及び前記 Df 南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更する手段と、得られた平面乙に対して、該北東方向の格子点に対して行った操作を、北西方向の格子点、南西方向の格子点及び南東方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、該平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数 F として定める手段とを備えた事の特徴とする。

【0034】

本発明の第三の実行装置では、3次元実領域上の構成された3次元構造格子と、該3次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該3次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記3次元実領域上の関数 F を定義する補間方法を実行する実行装置において、着目する胞を胞甲とし、胞甲の各辺を東西、南北あるいは天地にそれぞれ合わせた際に、東西南北天地方向に隣合う6胞に対して、前記胞甲の中心点と各6胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の2倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北、 Df 天、 Df 地とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 天と前記 Df 地が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 天地とし、前記 Df 東西と前記 Df 南北と前記 Df 天地の傾きを有し前記胞甲の中心における関数 f の値を通る補間関数の候補を構成してそれを平面乙とし、前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の7胞の中心での f 値を超えないように、前記

D f 東西、前記 D f 南北及び前記 D f 天地を 1 以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更する手段と、前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の 7 胞の中心での f 値を下回らないように前記 D f 東西、前記 D f 南北及び前記 D f 天地を 1 以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更する手段と、得られた補間関数の候補平面乙に対して、該北東天方向の格子点に対して行った操作を、北西天方向の格子点、南西天方向の格子点、南東天方向の格子点、北東地方向の格子点、北西地方向の格子点、南西地方向の格子点、及び南東地方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数 F として定める手段とを備えた事の特徴とする。

【0035】

本発明の第一の制御プログラムでは、1 次元実領域上に構成された 1 次元構造格子と、該 1 次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該 1 次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記 1 次元実領域上の関数 F を定義する補間方法を実行するためのコンピュータで実行可能な制御プログラムであって、着目する胞に対して、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が異なるときには傾きをゼロとし、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が同じ場合は、その絶対値の小さい方の 2 倍を傾きを選び、中心での値として前記着目する胞の中心の値 f を持ち、該傾きを持つ 1 次関数によって、該胞で定まる 1 次元実領域の部分領域上での該関数 F の値を定めるような内容を有することを特徴とする。

【0036】

本発明の第二の制御プログラムでは、2 次元実領域上に構成された 2 次元構造格子と、該 2 次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該 2 次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記 2 次元実領域上の関数 F を定義する補間方法を実行するためのコンピュータで実行可能な制御プログラムであって、着目する格子を胞甲とし、胞甲の各辺を東西あるいは南北にそれぞれ合わせた際に東西南北方向に隣合

う 4 胞に対して、前記胞甲の中心点と各 4 胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の 2 倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、前記 Df 東西と前記 Df 南北の傾きを有し前記胞甲の中心において胞甲の中心での前記関数 f の値を持つ平面を構成してそれを平面乙とし、前記胞甲の北東方向の格子点における前記平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の 3 胞の中心での f の値を超えないように Df 東西及び Df 南北を 1 以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更し、胞甲の北東方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、前記平面乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の 3 胞の中心での f の値を下回らないように前記 Df 東西及び前記 Df 南北を 1 以下の最大の定数により定数倍することにより前記平面乙を変更し、得られた平面乙に対して、該北東方向の格子点に対して行った操作を、北西方向の格子点、南西方向の格子点及び南東方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、該平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数 F として定めるような内容を有する事の特徴する。

【0037】

本発明の第三の制御プログラムでは、3 次元実領域上の構成された 3 次元構造格子と、該 3 次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該 3 次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記 3 次元実領域上の関数 F を定義する補間方法において、着目する格子を胞甲とし、胞甲の各辺を東西、南北あるいは天地にそれぞれ合わせた際に、東西南北天地方向に隣合う 6 胞に対して、前記胞甲の中心点と各 6 胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の 2 倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北、 Df 天、 Df 地とし、前記 Df 東と前記 Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、前記 Df 南と前記 Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南

北とし、前記D f 天と前記D f 地が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものをD f 天地とし、前記D f 東西と前記D f 南北と前記D f 天地の傾きを有し前記胞甲の中心における関数 f の値を通る補間関数の候補を構成してそれを平面乙とし、前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の7胞の中心での f 値を超えないように、前記D f 東西、前記D f 南北及び前記D f 天地を1以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更し、前記胞甲の北東天方向の格子点における平面乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、平面乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の7胞の中心での f 値を下回らないように前記D f 東西、前記D f 南北及び前記D f 天地を1以下の最大の定数により定数倍することにより平面乙を変更し、得られた補間関数の候補平面乙に対して、該北東天方向の格子点に対して行った操作を、北西天方向の格子点、南西天方向の格子点、南東天方向の格子点、北東地方向の格子点、北西地方向の格子点、南西地方向の格子点、及び南東地方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、平面乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数Fとして定めるような内容を有する事の特徴とする。

【0038】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の実施の形態を図面に基づいて説明する。

【0039】

[第1実施形態]

<第1実施形態の補間方法>

始めに本実施形態の補間方法について説明する。本実施形態は、データの再構築方法として、関数を区分的線形関数で補間する方法である。つまり、移流方程式の数値解法としては2次精度のものに対応するものである。

【0040】

本実施形態では、1次元の問題として、

$$\partial F(x, t) / \partial t = \partial C(x, t) F(x, t) / \partial x$$

… (18)

とする偏微分方程式を差分化して計算を行う問題を考える。 $F(x, t)$ を離散化したものとして $F(X, T)$ を考える。 F の引数 X , T は、以下離散的な空間格子及び離散時間を意味するものとする。

【0041】

まず、本実施形態の補間関数が、区分的 1 次関数

$$H[I, J](x) = F(I, J) + G(I, J) x$$

… (19)

として、既に得られているとして、上記の偏微分方程式の差分近似解を求める方法を述べる。本発明の補間関数 $H[I, J](x)$ の係数 $G(I, J)$ の求め方に関しては後で述べる。そこで述べるように、 $G(I, J)$ の決定方法が本発明の補間アルゴリズムの特徴である。 $G(I, J)$ の決定に際し、格子の幾何学的性質である隣接情報を利用することによって決定を行っていることは重要である。

【0042】

要するに、1次元実領域上の構成された1次元構造格子と、該1次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該1次元構造格子上の関数 $F(X, T)$ とが用意されたとき、該関数 $F(X, T)$ と該格子の幾何を利用することによって該関数 $F(X, T)$ を、該1次元実領域上の $H[I, J](x)$ として定義する事になる。すなわち、離散的な点でのみ定義されている F という写像が、 H ではその定義域が x 軸上全体の関数に広がる。

【0043】

もしも関数 $C(I+1/2, J)$ が正であれば、

$$Q(I+1/2, J) := C(I+1/2, J)H[I, J](\Delta x/2 - C(I, J) \Delta t/2)$$

… (20)

とし、そうでなければ、

$$Q(I+1/2, J) := C(I+1/2, J)H[I+1, J](-\Delta x/2 - C(I, J) \Delta t/2)$$

… (21)

と定義し、

$$F(I, J+1) = F(I, J) + \Delta t (Q(I+1/2, J) - Q(I-1/2, J)) / \Delta x$$

… (22)

とする。

【0044】

他方、区分的1次関数において勾配を表すスロープ関数 $G(I, J)$ を以下のように定める。まず、

$$Sp(I, J) := F(I+1, J) - F(I, J)$$

$$Sm(I, J) := F(I, J) - F(I-1, J)$$

… (23)

を導入する。本実施形態の1次元制限関数として、

$$\Delta F(I, J) = (\text{sgn}(Sp(I, J)) + \text{sgn}(Sm(I, J))) \cdot \text{Min}(|Sp(I, J)|, |Sm(I, J)|)$$

… (24)

を導入する。但し、 $\text{sgn}()$ は符号関数である。つまり、その引数が正のときには1、負の時には-1を返す関数である。従来例のminmod制限関数より2だけ大きいことが重要である。この $\Delta F(I, J)$ を利用して

$$G(I, J) = \Delta F(I, J) / \Delta x$$

… (25)

と定義すればよい。

【0045】

$Sp(I, J) / \Delta x$ は、上記式(23)の定義から前進差分、 $Sm(I, J) / \Delta x$ は上記式(23)の定義から後進差分を意味する。それらが異符号のときは、 $(\text{sgn}(Sp(I, J)) + \text{sgn}(Sm(I, J)))$ がゼロとなり、全体がゼロとなる。そうでないときは、 $G(I, J)$ は、 $(\text{sgn}(Sp(I, J)) + \text{sgn}(Sm(I, J)))$ が2または-2になるから、後進差分あるいは前進差分の絶対値の小さいものの2倍と一致する。

【0046】

このように本実施形態の補間方法は、1次元構造格子上の着目する胞に対して、該胞での F の前進差分と後進差分の符号が異なるときには傾きをゼロ、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が同じ場合は、その絶対値の小さい方の2倍を傾きを選び、中心での値を該着目する格子の中心での値 $F(X, T)$ を与え、1次関数によって、該胞で定まる1次元実領域の部分領域上での関数 $H(I, J)$ の値を定

めるものである。

【0047】

＜本実施形態の補間方法を利用した移流計算の流れ＞

図1は、上記した第1実施形態の補間方法を利用した移流計算の流れ図である。

【0048】

まず、ステップS1で初期設定をして、例えば、格子の生成、時間間隔を決定した後に関数の初期形状 $F(\cdot, 1)$ を初期化する。

【0049】

次のステップS2では、上述の $Q(\cdot, J)$ の計算を行う（上記式（20）及び式（21））。この時、上記式（20）及び式（21）に示すように、本実施形態の補間関数 H を利用する。そして、ステップS3で $Q(\cdot, J)$ のデータを基に、 $F(\cdot, J+1)$ の計算を行う（上記式（22））。

【0050】

その後はステップS4で時刻を更新する。すなわち、今解こうとしている問題は上記式（18）の時間発展方程式であるが、通常の時間発展方程式の数値解法の慣例に従い、時刻 $T = \Delta t \cdot J$ での F の値 $F(\cdot, J)$ を、 $F(\cdot, J-1)$ から求めた後に、時間を $T = \Delta t \cdot (J-1)$ から $T = \Delta t \cdot J$ に変更を行う。

【0051】

そして、ステップS5で最終ステップか否かの判断を行い、最終でなければ、ステップS2に戻り、最終ステップになるまで計算を行う。

【0052】

本実施形態の補間方法を利用すると、関数のスロープがゼロのものとシャープなものの2つの領域に分離され、2相の非圧縮性流体の形状表現関数としては非常に良い結果を得ることができる。その結果を表示したのが図2である。従来例の計算結果である図7～図9に対応した同じ条件で計算を行っており、初期値と1000ステップ後の形状を図示している。図2で示す本実施形態の移流計算結果は、図7～図9に示したものに比べて非常にシャープな矩形形状を保っていることが分かる。

【0053】

<本実施形態のハードウェア>

図3は、本実施形態の特徴を成す補間方法を利用した移流計算を実行する計算機の概観図であり、図4はその要部の電氣的構成を示すブロック図である。

【0054】

図3及び図4に示すように、この計算機は、複数のCPU116やメモリ118等からなる演算処理部、ハードディスク117やフロッピー（登録商標）ディスク110からなる記憶装置部、キーボード115やマウス114等からなる入力部、そしてディスプレイ112等からなる出力表示部などで構成されているシステムである。各演算部等は、本体111に収まっている。

【0055】

この計算機は、メモリ118上に図1に示したフローチャートに沿って設計しコード化されたプログラムをロードし、必要な計算領域を確保し、適当な方法で入力された領域形状や格子点座標および物理量に基づき所定の演算処理を行い、その結果得られた領域上での物理量の値をハードディスク117等へ書き込んで記憶させたり、ディスプレイ112上に表示させる。

【0056】

なお、本実施形態の特徴を成す上記補間方法を利用すると、不連続点を含みながらも、格子点上に与えられた値から実軸上の関数を構成することができる。このことより、本発明の補間方法を上記実施形態とは異なる状況、例えば信号処理のデータ抽出や、1次元画像処理等々で使用しても、同様にシャープな形状を表現するものとなる。

【0057】

[第2実施形態]

第2実施形態では、上記第1実施形態で説明した一次元の格子に対する補間アルゴリズムを二次元に拡張したものである。

【0058】

本実施形態で取り扱うものは、

$$\partial F(x, y, t) / \partial t = \partial Cx(x, y, t) F(x, y, t) / \partial x$$

$$+ \partial C_y(x, y, t) F(x, y, t) / \partial y \quad \dots (26)$$

とする 2 次元空間での偏微分方程式であり、これをを差分化して計算を行う問題を考える。F(x, y, t)を離散化したものとしてF(X, Y, T)を考える。Fの引数X, Y, Tは、以下離散的な空間格子及び離散時間を意味するものとする。

【0059】

まず、本実施形態の補間関数が、区分的 1 次関数

$$H[I, J, T](x, y) = F(I, J, T) + G_x(I, J, T) x + G_y(I, J, T) y \quad \dots (27)$$

として、既に得られているとして、上記の偏微分方程式の差分近似解を求める方法を述べる。本実施形態の補間関数H[I, J, T](x, y)の係数G_x(I, J, T)及びG_y(I, J, T)の求め方に関しては後で述べる。そこで述べるように、G_x(I, J, T)及びG_y(I, J, T)の決定方法が本実施形態の補間アルゴリズムの特徴である。G_x(I, J, T)及びG_y(I, J, T)の決定に際し、格子の幾何学的性質である隣接情報を利用することによって決定を行っていることは重要である。

【0060】

要するに、2次元実領域上の構成された2次元構造格子と、該2次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義されるある時刻Tでの該2次元構造格子上の関数F(X, Y, T)とが用意されたとき、該関数F(X, Y, T)と該格子の幾何を利用することによって該関数F(X, Y, T)を、該2次元実領域上のH[I, J, T](x, y)として定義する事になる。

【0061】

もしも 関数C_x(I+1/2, J, T)が正であれば、

$$Q_x(I+1/2, J, T) := C_x(I+1/2, J, T) \\ H[I, J, T](\Delta x/2 - C_x(I, J, T) \Delta t/2, - C_y(I, J, T) \Delta t/2) \quad \dots (28)$$

とし、そうでなければ、

$$Q_x(I+1/2, J, T) := C_x(I+1/2, J, T) \\ H[I+1, J, T](-\Delta x/2 + C_x(I, J, T) \Delta t/2, - C_y(I, J, T) \Delta t/2)$$

... (29)

と定義し、

また、もしも 関数 $C_y(I, J+1/2, T)$ が正であれば、

$$Q_y(I, J+1/2, J, T) := C_y(I, J+1/2, T)$$

$$H[I, J, T](-C_x(I, J, T) \Delta t/2, \Delta y/2 - C_y(I, J, T) \Delta t/2)$$

... (30)

とし、そうでなければ、

$$Q_y(I, J+1/2, J, T) := C_y(I, J+1/2, T)$$

$$H[I, J+1, T](-C_x(I, J, T) \Delta t/2,$$

$$-\Delta y/2 - C_y(I, J, T) \Delta t/2)$$

... (31)

と定義し、

$$F(I, J, T+1) = F(I, J, T) + \Delta t (Q_x(I+1/2, J, T) - Q_x(I-1/2, J, T)) / \Delta x$$

$$+ \Delta t (Q_y(I, J+1/2, T) - Q_y(I, J-1/2, T)) / \Delta y$$

... (32)

とする。

【0062】

他方、区分的 1 次関数において勾配を表すスロープ関数 $G(I, J, T)$ を以下のように定める。

【0063】

まず、

$$S_{xp}(I, J, T) := F(I+1, J, T) - F(I, J, T)$$

$$S_{xm}(I, J, T) := F(I, J, T) - F(I-1, J, T)$$

$$S_{yp}(I, J, T) := F(I, J+1, T) - F(I, J, T)$$

$$S_{ym}(I, J, T) := F(I, J, T) - F(I, J-1, T)$$

... (33)

を導入する。本実施形態の 1 次元制限関数として、

$$S_x(I, J) = (\text{sgn}(S_{xp}(I, J, T)) + \text{sgn}(S_{xm}(I, J, T))) \cdot \text{Min}(|S_{xp}(I, J, T)|,$$

$$|S_{xm}(I, J, T)|)$$

$$S_y(I, J) = (\text{sgn}(S_{yp}(I, J, T)) + \text{sgn}(S_{ym}(I, J, T))) \cdot \text{Min}(|S_{yp}(I, J, T)|, |S_{ym}(I, J, T)|)$$

... (34)

を導入する。

【0064】

次に、

$$V_{ppmin} = \text{Min}(F(I, J+1, T) - F(I, J, T), F(I+1, J+1, T) - F(I, J, T), -\epsilon, F(I+1, J, T) - F(I, J, T))$$

$$V_{mpmin} = \text{Min}(F(I-1, J+1, T) - F(I, J, T), F(I, J+1, T) - F(I, J, T), F(I-1, J, T) - F(I, J, T), -\epsilon)$$

$$V_{pmmmin} = \text{Min}(-\epsilon, F(I+1, J, T) - F(I, J, T), F(I, J-1, T) - F(I, J, T), F(I+1, J-1, T) - F(I, J, T))$$

$$V_{mmmin} = \text{Min}(F(I-1, J, T) - F(I, J, T), -\epsilon, F(I-1, J-1, T) - F(I, J, T), F(I, J-1, T) - F(I, J, T))$$

... (35)

と、

$$V_{ppmax} = \text{Max}(F(I, J+1, T) - F(I, J, T), F(I+1, J+1, T) - F(I, J, T), -\epsilon, F(I+1, J, T) - F(I, J, T))$$

$$V_{mpmax} = \text{Max}(F(I-1, J+1, T) - F(I, J, T), F(I, J+1, T) - F(I, J, T), F(I-1, J, T) - F(I, J, T), -\epsilon)$$

$$V_{pmmmax} = \text{Max}(-\epsilon, F(I+1, J, T) - F(I, J, T), F(I, J-1, T) - F(I, J, T), F(I+1, J-1, T) - F(I, J, T))$$

$$V_{mmmax} = \text{Max}(F(I-1, J, T) - F(I, J, T), -\epsilon, F(I-1, J-1, T) - F(I, J, T), F(I, J-1, T) - F(I, J, T))$$

... (36)

を定義する。

【0065】

更に

$$h_{pp}(I, J, T) = S_x(I, J, T)/2. + S_x(I, J, T)/2.$$

$$hmp(I, J, T) = -Sx(I, J, T)/2. + Sx(I, J, T)/2.$$

$$hpm(I, J, T) = Sx(I, J, T)/2. - Sx(I, J, T)/2.$$

$$hmm(I, J, T) = -Sx(I, J, T)/2. - Sx(I, J, T)/2.$$

... (37)

とする。

【0066】

更に、「 $phipp=phimp=hipm=phimm=1$ としておき、もし $(hpp > Vppmax)$ ならば、 $phipp = Vppmax/hpp$ と置き直す。もし、 $(hpp < Vppmin)$ ならば、 $phipp = Vppmin/hpp$ と置き直す。

【0067】

同様に、もし $(hpm > Vpmmax)$ ならば、 $phimp = Vpmmax/hpm$ と置き直す。またもし、 $(hpm < Vpmmin)$ ならば、 $phimp = Vpmmin/hpm$ と置き直す。もし $(hmp > Vmpmax)$ ならば、 $phimp = Vmpmax/hmp$ と置き直す。またもし、 $(hmp < Vmpmin)$ ならば、 $phimp = Vmpmin/hmp$ と置き直す。もし $(hmm > Vmmmax)$ ならば、 $phimm = Vmmmax/hmm$ と置き直す。またもし、 $(hmm < Vmmmin)$ ならば、 $phimm = Vmmmin/hmm$ と置き直す。」という計算を行う。

【0068】

このようにして得られた $phipp, phimp, hipm, phimm$ に対して、

$$Gx(I, J, T) = \text{Min}(phipp, phimp, hipm, phimm) Sx(I, J, T)/\Delta x$$

$$Gy(I, J, T) = \text{Min}(phipp, phimp, hipm, phimm) Sy(I, J, T)/\Delta y$$

... (38)

とした後に、 (I, J) 格子内の補間関数 $H(I, J, T)(x, y)$ を

$$H(I, J, T)(x, y) = F(I, J, T) + Gx(I, J, T) x + Gy(I, J, T) y$$

... (39)

とするものである。

【0069】

このように本実施形態の補間方法を以下にまとめると、着目する格子を胞甲とし、胞甲の各辺を東西あるいは南北にそれぞれ合わせた際に東西南北方向に隣合う4胞に対して、胞甲の中心点と各4胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の

2 倍の値をそれぞれDf東、Df西、Df南、Df北とし、Df東とDf西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものをDf東西とし、Df南とDf北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものをDf南北とし、Df東西とDf南北の傾きを持ち、胞甲の中心における f の値を通る平面を構成し、それを乙と呼ぶと、胞甲の北東方向の格子点における乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での f 値を超えないようにDf東西及びDf南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより乙を変更する。また、胞甲の北東方向の格子点における乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、乙の該北東方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の3胞の中心での f 値を下回らないようにDf東西及びDf南北を1以下の最大の定数により定数倍することにより乙を変更する。このようにして得られた平面乙に対して、該北東方向の格子点に対して行った操作を、北西方向の格子点、南西方向の格子点及び南東方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補間関数Hとして定める。このアルゴリズムと上記のアルゴリズムは等価である。

【0070】

＜第2実施形態の補間方法を利用した移流計算の流れ＞

図5は、上記した第2実施形態の補間方法を利用した移流計算の流れ図である。

【0071】

まず、ステップS11で初期設定をして、例えば、格子の生成、時間間隔を決定した後に関数の初期形状 $F(\cdot, \cdot, 1)$ を初期化する。

【0072】

次のステップS12では、上述の $Q(\cdot, \cdot, J)$ の計算を行う（上記式（28）、式（29）、式（30）、式（31））。この時、上記式（28）及び式（29）に示すように、本発明の補間関数Hを利用する。そして、ステップS13で $Q(\cdot, \cdot, J)$ のデータを基に、 $F(\cdot, \cdot, J+1)$ の計算を行う（上記式（22））。

【0073】

その後はステップ S 14 で時刻を更新する。すなわち、今解こうとしている問題は上記式 (18) の時間発展方程式であるが、通常の時間発展方程式の数値解法の慣例に従い、時刻 $T = \Delta t J$ での F の値 $F(\cdot, \cdot, J)$ を、 $F(\cdot, \cdot, J-1)$ から求めた後に、時間を $T = \Delta t * (J-1)$ から $T = \Delta t * J$ に変更を行う。

【0074】

そして、ステップ S 15 で最終ステップか否かの判断を行い、最終でなければ、ステップ S 12 に戻り、最終ステップになるまで計算を行う。

【0075】

本実施形態の補間方法を利用すると、関数のスロープがゼロのものとシャープなものの 2 つの領域に分離され、2 相の非圧縮性流体の形状表現関数としては非常に良い結果を得ることができる。その結果を表示したのが図 6 (a), (b) である。従来例の計算結果である図 10 (a), (b) に対応した同じ条件で計算を行っており、初期値と 1000 ステップ後の形状を図示している。図 6 (b) で示す本実施形態の移流計算結果は、図 10 (b) に示したものに比べて非常にシャープな矩形形状を保っていることが分かる。

【0076】

<本実施形態のハードウェア>

本実施形態の特徴を成す補間方法を利用した移流計算を実行する計算機は、図 3 及び図 4 に示したものと同様である。

【0077】

[第 3 実施形態]

第 3 実施形態では、上記第 2 実施形態で説明した二次元の格子に対する補間アルゴリズムを三次元に拡張したものである。本実施形態で取り扱うものは、

$$\begin{aligned} \partial F(x, y, z, t) / \partial t = & \partial C_x(x, y, z, t) F(x, y, z, t) / \partial x \\ & + \partial C_y(x, y, z, t) F(x, y, z, t) / \partial y \\ & + \partial C_z(x, y, z, t) F(x, y, z, t) / \partial z \\ & \dots (40) \end{aligned}$$

とする 3 次元空間の偏微分方程式であり、これを差分化して計算を行う問題を考

える。F(x, y, z, t)を離散化したものとしてF(X, Y, Z, T)を考える。Fの引数X, Y, Z, Tは、以下離散的な空間格子及び離散時間を意味するものとする。

【0078】

まず、本実施形態の補間関数が、区分的1次関数

$$\begin{aligned} H[I, J, K, T](x, y, z) = & F(I, J, K, T) + G_x(I, J, K, T) x \\ & + G_y(I, J, K, T) y + G_z(I, J, K, T) z \end{aligned} \quad \dots (41)$$

として、既に得られているとして、上記の偏微分方程式の差分近似解を求める方法を述べる。本実施形態の補間関数H[I, J, K, T](x, y, z)の係数G_x(I, J, K, T)、G_y(I, J, K, T)及びG_z(I, J, K, T)の求め方に関しては後で述べる。そこで述べるように、G_x(I, J, K, T)、G_y(I, J, K, T)及びG_z(I, J, K, T)の決定方法が本実施形態の補間アルゴリズムの特徴である。G_x(I, J, T)及びG_y(I, J, T)の決定に際し、格子の幾何学的性質である隣接情報を利用することによって決定を行っていることは重要である。

【0079】

要するに、3次元実領域上の構成された3次元構造格子と、該3次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義されるある時刻Tでの該3次元構造格子上の関数F(X, Y, Z, T)とが用意されたとき、該関数F(X, Y, Z, T)と該格子の幾何を利用することによって該関数F(X, Y, Z, T)を拡張・補間して該3次元実領域上の関数H[I, J, K, T](x, y, z)を定義するものである。

【0080】

もしも関数C_x(I+1/2, J, K, T)が正であれば、

$$\begin{aligned} Q_x(I+1/2, J, K, T) &:= C_x(I+1/2, J, K, T) \\ H[I, J, K, T](\Delta x/2 - C_x(I, J, K, T) \Delta t/2, \\ &- C_y(I, J, K, T) \Delta t/2, - C_z(I, J, K, T) \Delta t/2) \end{aligned} \quad \dots (42)$$

とし、そうでなければ、

$$\begin{aligned} Q_x(I+1/2, J, K, T) &:= C_x(I+1/2, J, K, T) \\ H[I+1, J, K, T](-\Delta x/2 + C_x(I, J, K, T) \Delta t/2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - C_y(I, J, K, T) \Delta t/2, - C_z(I, J, K, T) \Delta t/2) \\
 & \dots (43)
 \end{aligned}$$

と定義し、

また、もしも関数 $C_y(I, J+1/2, K, T)$ が正であれば、

$$\begin{aligned}
 Q_y(I, J+1/2, K, J, T) &:= C_y(I, J+1/2, K, T) \\
 H[I, J, K, T] &(- C_x(I, J, K, T) \Delta t/2, \\
 &\Delta y/2 - C_y(I, J, K, T) \Delta t/2, - C_z(I, J, K, T) \Delta t/2) \\
 &\dots (44)
 \end{aligned}$$

とし、そうでなければ、

$$\begin{aligned}
 Q_y(I, J+1/2, K, J, T) &:= C_y(I, J+1/2, K, T) \\
 H[I, J+1, K, T] &(- C_x(I, J, K, T) \Delta t/2, \\
 &-\Delta y/2 - C_y(I, J, K, T) \Delta t/2, - C_z(I, J, K, T) \Delta t/2) \\
 &\dots (45)
 \end{aligned}$$

と定義し、

また、もしも関数 $C_z(I, J, K+1/2, T)$ が正であれば、

$$\begin{aligned}
 Q_z(I, J, K+1/2, J, T) &:= C_z(I, J, K+1/2, T) \\
 H[I, J, K, T] &(- C_x(I, J, K, T) \Delta t/2, \\
 &- C_y(I, J, K, T) \Delta t/2, \Delta z/2 - C_z(I, J, K, T) \Delta t/2) \\
 &\dots (46)
 \end{aligned}$$

とし、そうでなければ、

$$\begin{aligned}
 Q_z(I, J, K+1/2, J, T) &:= C_z(I, J, K+1/2, T) \\
 H[I, J, K+1, T] &(- C_x(I, J, K, T) \Delta t/2, \\
 &- C_y(I, J, K, T) \Delta t/2, -\Delta z/2 - C_z(I, J, K, T) \Delta t/2) \\
 &\dots (47)
 \end{aligned}$$

と定義し、

$$\begin{aligned}
 F(I, J, K, T+1) &= F(I, J, K, T) + \Delta t (Q_x(I+1/2, J, T) \\
 &- Q_x(I-1/2, J, T)) / \Delta x + \Delta t (Q_y(I, J+1/2, K, T) \\
 &- Q_y(I, J-1/2, K, T)) / \Delta y + \Delta t (Q_z(I, J, K+1/2, T) \\
 &- Q_z(I, J, K-1/2, T)) / \Delta z
 \end{aligned}$$

… (48)

とする。

【0081】

他方、区分的1次関数において勾配を表すスロープ関数 $G(I, J, K, T)$ を以下のよう
に定める。

【0082】

まず、

$$Sxp(I, J, K, T) = F(I+1, J, K, T) - F(I, J, K, T)$$

$$Sxm(I, J, K, T) = F(I, J, K, T) - F(I-1, J, K, T)$$

$$Syp(I, J, K, T) = F(I, J+1, K, T) - F(I, J, K, T)$$

$$Sym(I, J, K, T) = F(I, J, K, T) - F(I, J-1, K, T)$$

$$Szp(I, J, K, T) = F(I, J, K+1, T) - F(I, J, K, T)$$

$$Szm(I, J, K, T) = F(I, J, K, T) - F(I, J, K-1, T)$$

… (49)

を導入する。本実施形態の1次元制限関数として、

$$Sx(I, J, K) = (\text{sgn}(Sxp(I, J, K, T)) + \text{sgn}(Sxm(I, J, K, T))) \text{Min}(|Sxp(I, J, K, T)|, \\ |Sxm(I, J, K, T)|)$$

$$Sy(I, J, K) = (\text{sgn}(Syp(I, J, K, T)) + \text{sgn}(Sym(I, J, K, T))) \text{Min}(|Syp(I, J, K, T)|, \\ |Sym(I, J, K, T)|)$$

$$Sz(I, J, K) = (\text{sgn}(Szp(I, J, K, T)) + \text{sgn}(Szm(I, J, K, T))) \text{Min}(|Szp(I, J, K, T)|, \\ |Szm(I, J, K, T)|)$$

… (50)

を導入する。

【0083】

次に、

$$Vppmin = \text{Min}(F(I, J+1, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I+1, J+1, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$- \epsilon,$$

$$F(I+1, J, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I, J+1, K+1, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I+1, J+1, K+1, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I, J, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J, K+1, T) - F(I, J, K, T))$$

$$V_{mppmin} = \text{Min}(F(I-1, J+1, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I, J+1, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I-1, J, K, T) - F(I, J, K, T), -\epsilon,$$

$$F(I-1, J+1, K+1, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I, J+1, K+1, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I-1, J, K+1, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I, J, K+1, T) - F(I, J, K, T))$$

$$V_{ppmin} = \text{Min}(-\epsilon, F(I+1, J, K, T) - F(I, J, K, T)$$

$$F(I, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J-1, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I, J, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J, K+1, T) - F(I, J, K, T)$$

$$F(I, J-1, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J-1, K+1, T) - F(I, J, K, T))$$

$$V_{mmpmin} = \text{Min}(F(I-1, J, K, T) - F(I, J, K, T), -\epsilon$$

$$F(I-1, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I, J-1, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I-1, J, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J, K+1, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I-1, J-1, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J-1, K+1, T) - F(I, J, K, T))$$

$$V_{ppmmin} = \text{Min}(F(I, J+1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J+1, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$-\epsilon, F(I+1, J, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I, J+1, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J+1, K-1, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I, J, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J, K-1, T) - F(I, J, K, T))$$

$$V_{mpmmin} = \text{Min}(F(I-1, J+1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I, J+1, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I-1, J, K, T) - F(I, J, K, T), -\epsilon,$$

$$F(I-1, J+1, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J+1, K-1, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I-1, J, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J, K-1, T) - F(I, J, K, T))$$

$$V_{pmmmin} = \text{Min}(-\epsilon, F(I+1, J, K, T) - F(I, J, K, T)$$

$$F(I, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J-1, K, T) - F(I, J, K, T),$$

$$F(I, J, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J, K-1, T) - F(I, J, K, T)$$

$$F(I, J-1, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J-1, K-1, T) - F(I, J, K, T))$$

$$\begin{aligned}
 V_{mmmin} = & \text{Min}(F(I-1, J, K, T) - F(I, J, K, T), -\epsilon \\
 & F(I-1, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I-1, J, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J, K-1, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I-1, J-1, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J-1, K-1, T) - F(I, J, K, T)) \\
 & \dots (51)
 \end{aligned}$$

と、

$$\begin{aligned}
 V_{pppmax} = & \text{Max}(F(I, J+1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J+1, K, T) - F(I, J, K, T), \\
 & -\epsilon, F(I+1, J, K, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I, J+1, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J+1, K+1, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I, J, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J, K+1, T) - F(I, J, K, T)) \\
 V_{mppmax} = & \text{Max}(F(I-1, J+1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I, J+1, K, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I-1, J, K, T) - F(I, J, K, T), -\epsilon, \\
 & F(I-1, J+1, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J+1, K+1, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I-1, J, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J, K+1, T) - F(I, J, K, T)) \\
 V_{pmpmax} = & \text{Max}(-\epsilon, F(I+1, J, K, T) - F(I, J, K, T) \\
 & F(I, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I, J, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J, K+1, T) - F(I, J, K, T) \\
 & F(I, J-1, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J-1, K+1, T) - F(I, J, K, T)) \\
 V_{mmpmax} = & \text{Max}(F(I-1, J, K, T) - F(I, J, K, T), -\epsilon \\
 & F(I-1, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I-1, J, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J, K+1, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I-1, J-1, K+1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J-1, K+1, T) - F(I, J, K, T)) \\
 V_{ppmmax} = & \text{Max}(F(I, J+1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J+1, K, T) - F(I, J, K, T), \\
 & -\epsilon, F(I+1, J, K, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I, J+1, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J+1, K-1, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I, J, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J, K-1, T) - F(I, J, K, T)) \\
 V_{mpmmax} = & \text{Max}(F(I-1, J+1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I, J+1, K, T) - F(I, J, K, T), \\
 & F(I-1, J, K, T) - F(I, J, K, T), -\epsilon, \\
 & F(I-1, J+1, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J+1, K-1, T) - F(I, J, K, T),
 \end{aligned}$$

$$F(I-1, J, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J, K-1, T) - F(I, J, K, T))$$

$$\begin{aligned} V_{pmmmmax} = \text{Max}(& -\epsilon, F(I+1, J, K, T) - F(I, J, K, T) \\ & F(I, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), \\ & F(I, J, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J, K-1, T) - F(I, J, K, T) \\ & F(I, J-1, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I+1, J-1, K-1, T) - F(I, J, K, T)) \\ V_{mmmmmax} = \text{Max}(& F(I-1, J, K, T) - F(I, J, K, T), -\epsilon \\ & F(I-1, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), F(I, J-1, K, T) - F(I, J, K, T), \\ & F(I-1, J, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J, K-1, T) - F(I, J, K, T), \\ & F(I-1, J-1, K-1, T) - F(I, J, K, T), F(I, J-1, K-1, T) - F(I, J, K, T)) \\ & \dots (52) \end{aligned}$$

を定義する。

【0084】

更に、

$$\begin{aligned} h_{ppp}(I, J, K, T) &= S_x(I, J, K, T)/2. + S_x(I, J, K, T)/2 + S_z(I, J, K, T)/2. \\ h_{mpp}(I, J, K, T) &= -S_x(I, J, K, T)/2. + S_x(I, J, K, T)/2 + S_z(I, J, K, T)/2. \\ h_{pmp}(I, J, K, T) &= S_x(I, J, K, T)/2. - S_x(I, J, K, T)/2 + S_z(I, J, K, T)/2. \\ h_{mmp}(I, J, K, T) &= -S_x(I, J, K, T)/2. - S_x(I, J, K, T)/2 + S_z(I, J, K, T)/2. \\ h_{ppm}(I, J, K, T) &= S_x(I, J, K, T)/2. + S_x(I, J, K, T)/2 - S_z(I, J, K, T)/2. \\ h_{mpm}(I, J, K, T) &= -S_x(I, J, K, T)/2. + S_x(I, J, K, T)/2 - S_z(I, J, K, T)/2. \\ h_{pmm}(I, J, K, T) &= S_x(I, J, K, T)/2. - S_x(I, J, K, T)/2 - S_z(I, J, K, T)/2. \\ h_{mmm}(I, J, K, T) &= -S_x(I, J, K, T)/2. - S_x(I, J, K, T)/2 - S_z(I, J, K, T)/2. \\ &\dots (53) \end{aligned}$$

とする。

【0085】

更に、「 $phipp=phimpp=hipmp=phimpp=phippm=phimp=hipmm=phimmm=1$ と
しておき、もし $(h_{ppp} > V_{pppmax})$ ならば、 $phipp = V_{pppmax}/h_{ppp}$ と置き直
す。もし $(h_{ppp} < V_{pppmin})$ ならば、 $phipp = V_{pppmin}/h_{ppp}$ と置き直す。同
様に、もし $(h_{pmp} > V_{pmpmax})$ ならば、 $hipmp = V_{pmpmax}/h_{pmp}$ と置き直す。
またもし、 $(h_{pmp} < V_{pmpmin})$ ならば、 $hipmp = V_{pmpmin}/h_{pmp}$ と置き直す。もし

(hmp > Vmppmax) ならば、 phimp = Vmppmax/hmp と置き直す。またもし、
(hmp < Vmppmin) ならば、 phimp = Vmppmin/hmp と置き直す。もし (hmp
> Vmppmax) ならば、 phimp = Vmppmax/hmp と置き直す。

【0086】

またもし、 (hmp < Vmppmin) ならば、 phimp = Vmppmin/hmp と置き直す。
もし (hpm > Vppmmax) ならば、 phipp = Vppmmax/hpm と置き直す。また
もし (hpm < Vppmmin) ならば、 phipp = Vppmmin/hpm と置き直す。もし (
hpm > Vppmmax) ならば、 phipp = Vppmmax/hpm と置き直す。またもし、 (h
pm < Vppmmin) ならば、 phipp = Vppmmin/hpm と置き直す。もし (hpm >
Vppmmax) ならば、 phipp = Vppmmax/hpm と置き直す。

【0087】

またもし、 (hpm < Vppmmin) ならば、 phipp = Vppmmin/hpm と置き直す。
もし (hmm > Vppmmax) ならば、 phimm = Vppmmax/hmm と置き直す。また
もし、 (hmm < Vppmmin) ならば、 phimm = Vppmmin/hmm と置き直す。」と
いう計算を行う。

【0088】

このようにして得られた phipp, phimp, phipp, phimp, phipp, phimp, phipp, phimp
m, phimm に対して、

$$G_x(I, J, K, T) = \text{Min}(phipp, phimp, phipp, phimp, phipp, phimp, phipp, phimp) S_x(I, J, K, T) / \Delta x$$

$$G_y(I, J, K, T) = \text{Min}(phipp, phimp, phipp, phimp, phipp, phimp, phipp, phimp) S_y(I, J, K, T) / \Delta y$$

$$G_z(I, J, K, T) = \text{Min}(phipp, phimp, phipp, phimp, phipp, phimp, phipp, phimp) S_z(I, J, K, T) / \Delta z$$

とした後に、(I, J, K) 格子内の補間関数 $H(I, J, K, T)(x, y, z)$ を

$$\begin{aligned} H[I, J, K, T](x, y, z) \\ = F(I, J, K, T) + G_x(I, J, K, T) x \\ + G_y(I, J, K, T) y + G_z(I, J, K, T) z \quad \dots (54) \end{aligned}$$

とするものである。

【0089】

このように本実施形態の補間方法をまとめると、着目する格子を胞甲とし、胞甲の各辺を東西あるいは南北あるいは天地にそれぞれ合わせた際に東西南北天地方向に隣合う6胞に対して、胞甲の中心点と各6胞の中心点との前記関数 f の片側差分値の2倍の値をそれぞれ Df 東、 Df 西、 Df 南、 Df 北、 Df 天、 Df 地とし、 Df 東と Df 西が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 東西とし、 Df 南と Df 北が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 南北とし、 Df 天と Df 地が異符号の場合はゼロ、同符号の場合はその絶対値の小さいものを Df 天地とし、 Df 東西と Df 南北と Df 天地の傾きを持ち、胞甲の中心における f の値を通る補関関数の候補を構成し、それを乙と呼ぶと、胞甲の北東天方向の格子点における乙の値が胞甲の中心の値より大きい場合は、乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の7胞の中心での f 値を超えないように、 Df 東西及び Df 南北及び Df 天地を1以下の最大の定数により定数倍することにより乙を変更する。また、胞甲の北東天方向の格子点における乙の値が胞甲の中心の値より小さい場合は、乙の該北東天方向の格子点での値が、該格子点を共有する胞甲以外の7胞の中心での f 値を下回らないように、 Df 東西及び Df 南北及び Df 天地を1以下の最大の定数により定数倍することにより乙を変更する。

【0090】

このようにして得られた補関関数の候補乙に対して、該北東天方向の格子点に対して行った操作を、北西天方向の格子点、南西天方向の格子点、南東天方向の格子点、北東地方向の格子点、北西地方向の格子点、南西地方向の格子点、及び南東地方向の格子点に対してそれぞれ行うことにより、乙の傾きを変更させ、得られた平面を該胞甲内での前記補関関数 F として定める事により補関関数を得る。このアルゴリズムと上記に示したアルゴリズムと等価である。

【0091】

上記した本実施形態の補間方法を利用した移流計算の流れ図は、図5に示したものと同様である。また、本第3実施形態の補間方法を図3及び図4で説明したと同様にコンピュータ上で実現することができる。本実施形態においても、前述

した第2実施形態における2次元のものと同様に形状をシャープに保ったまま移流計算が行うことができる。

【0092】

なお、上記第2及び第3実施形態の補間方法を利用すると、不連続点を含みながらも格子点上に与えられた値から2次元あるいは3次元空間上の関数を構成することができる。このことより、本発明の補間方法を上記実施形態とは異なる状況、例えば画像データの再現、2次元あるいは3次元のデジタル対象のデータの詳細化等々で使用しても、同様にシャープな形状を表現するものとなる。

【0093】

本発明は、上述した実施形態の装置に限定されず、複数の機器から構成されるシステムに適用しても、1つの機器から成る装置に適用してもよい。前述した実施形態の機能を実現するソフトウェアのプログラムコードを記憶した記憶媒体をシステムあるいは装置に供給し、そのシステムあるいは装置のコンピュータ（またはCPUやMPU）が記憶媒体に格納されたプログラムコードを読み出し実行することによっても、完成されることは言うまでもない。

【0094】

この場合、記憶媒体から読み出されたプログラムコード自体が前述した実施形態の機能を実現することになり、そのプログラムコードを記憶した記憶媒体は本発明を構成することになる。プログラムコードを供給するための記憶媒体としては、例えば、フロッピー（登録商標）ディスク、ハードディスク、光ディスク、光磁気ディスク、CD-ROM、CD-R、磁気テープ、不揮発性のメモリカード、ROMを用いることができる。また、コンピュータが読み出したプログラムコードを実行することにより、前述した実施形態の機能が実現されるだけでなく、そのプログラムコードの指示に基づき、コンピュータ上で稼動しているOSなどが実際の処理の一部または全部を行い、その処理によって前述した実施形態の機能が実現される場合も含まれることは言うまでもない。

【0095】

さらに、記憶媒体から読み出されたプログラムコードが、コンピュータに挿入された機能拡張ボードやコンピュータに接続された機能拡張ユニットに備わるメ

メモリに書き込まれた後、次のプログラムコードの指示に基づき、その拡張機能を拡張ボードや拡張ユニットに備わるCPUなどが処理を行って実際の処理の一部または全部を行い、その処理によって前述した実施形態の機能が実現される場合も含まれることは言うまでもない。

【0096】

【発明の効果】

以上詳細に説明したように本発明によれば、2相の非圧縮性流体における流体体積法（VOF法）において、形状をシャープに保持させたまま時間発展させることが可能な補間アルゴリズムを実現することが可能であり、2相の非圧縮性流体の形状表現関数としては非常に良い結果を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

第1実施形態の補間方法を利用した移流計算の流れ図である。

【図2】

第1実施形態の補間方法を利用した移流計算の結果を示す図である。

【図3】

第1実施形態の特徴を成す補間方法を利用した移流計算を実行する計算機の概観図である。

【図4】

本発明の補間方法を利用した移流計算用の計算機の要部構成を示すブロック図である。

【図5】

第2実施形態の補間方法を利用した移流計算の流れ図である。

【図6】

第2及び第3実施形態の補間方法を利用した移流計算の結果を示す図である。

【図7】

従来の補間方法を利用した移流計算の結果を示す図である。

【図8】

従来の補間方法を利用した移流計算の結果を示す図である。

【図 9】

従来の補間方法を利用した移流計算の結果を示す図である。

【図 1 0】

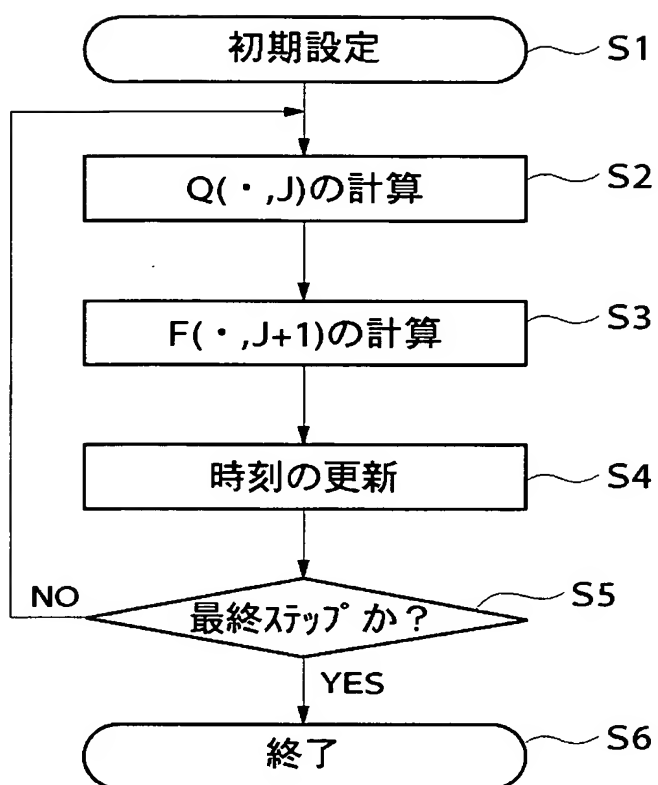
従来の補間方法（高次元）を利用した移流計算の結果を示す図である。

【符号の説明】

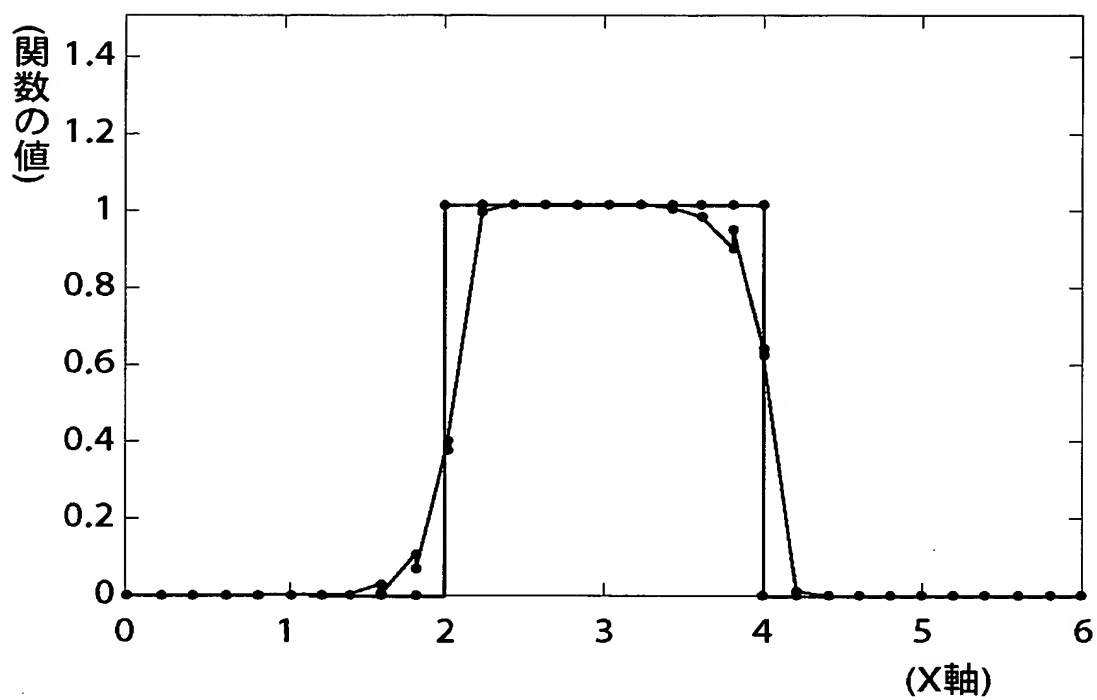
- 1 1 0 フロッピー（登録商標）ディスク
- 1 1 1 計算機の本体
- 1 1 2 ディスプレイ
- 1 1 3 フロッピー（登録商標）ディスクドライブ、
- 1 1 4 マウス
- 1 1 5 キーボード
- 1 1 6 CPU、
- 1 1 7 ハードディスク
- 1 1 8 メモリ

【書類名】 図面

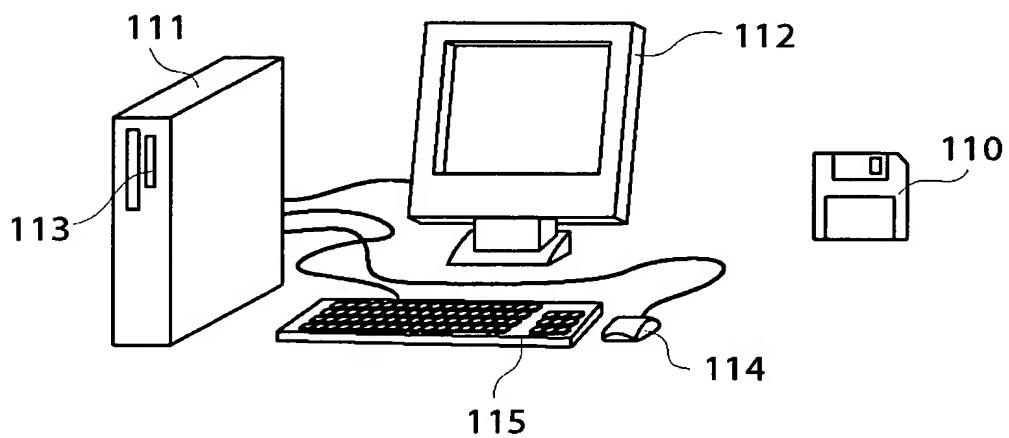
【図 1】



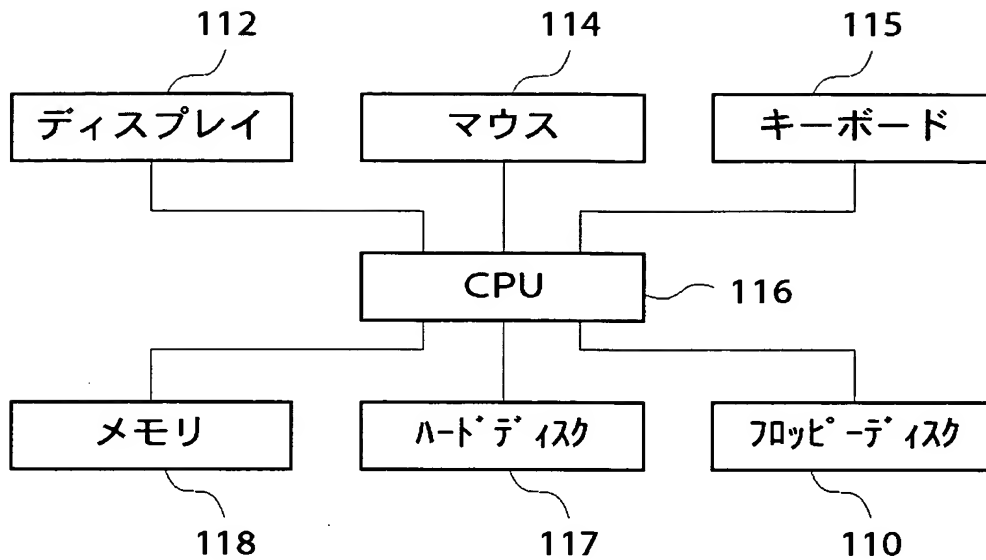
【図 2】



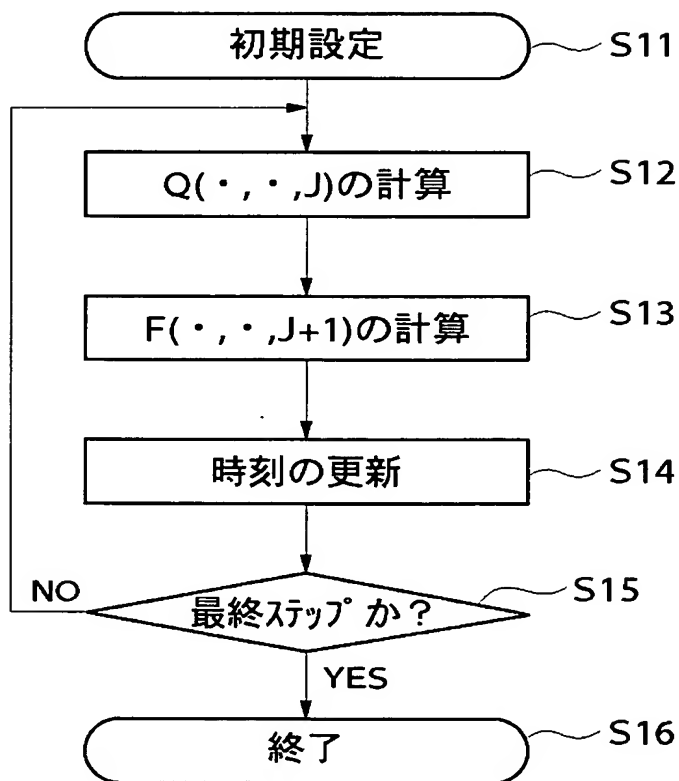
【図 3】



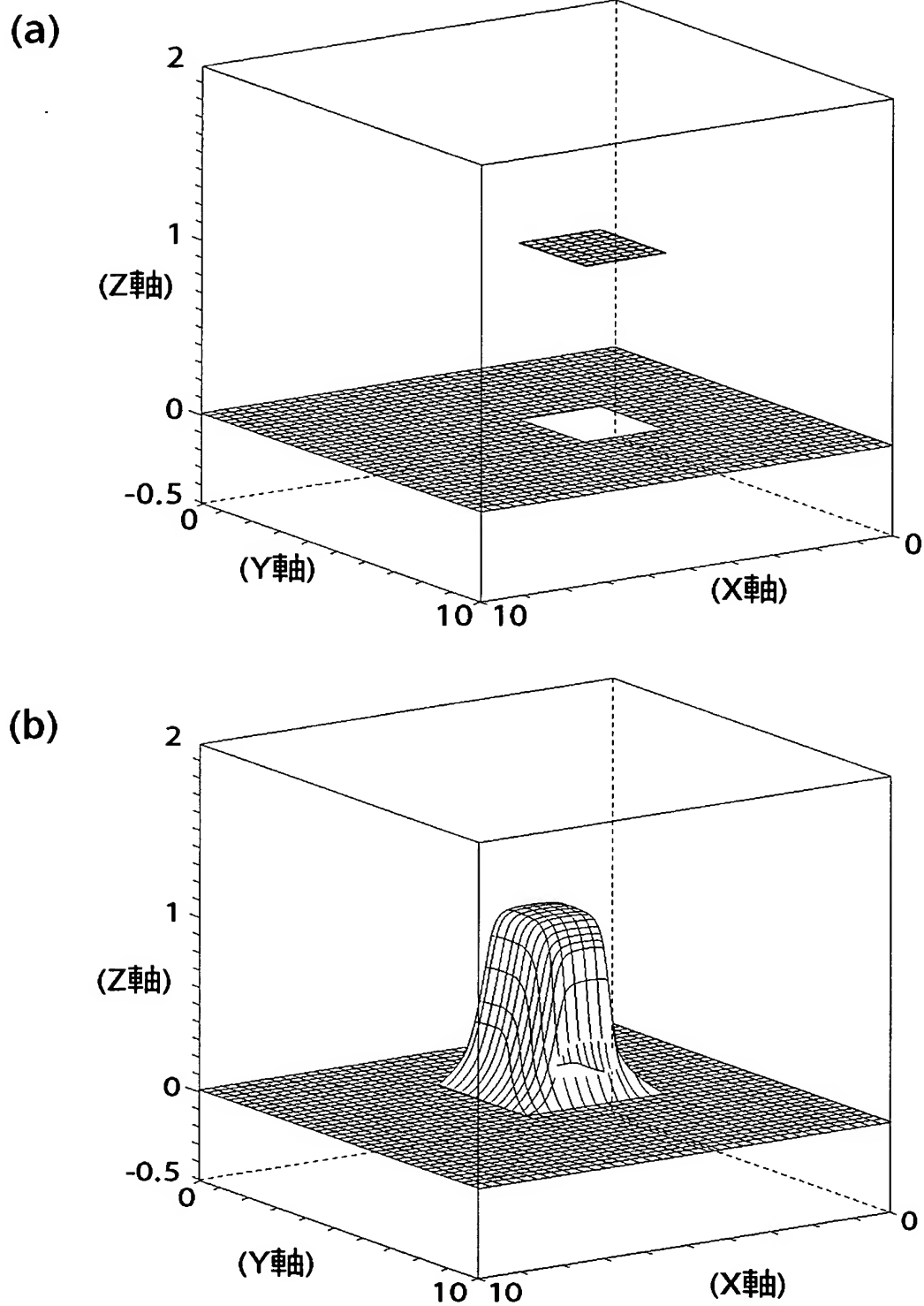
【図 4】



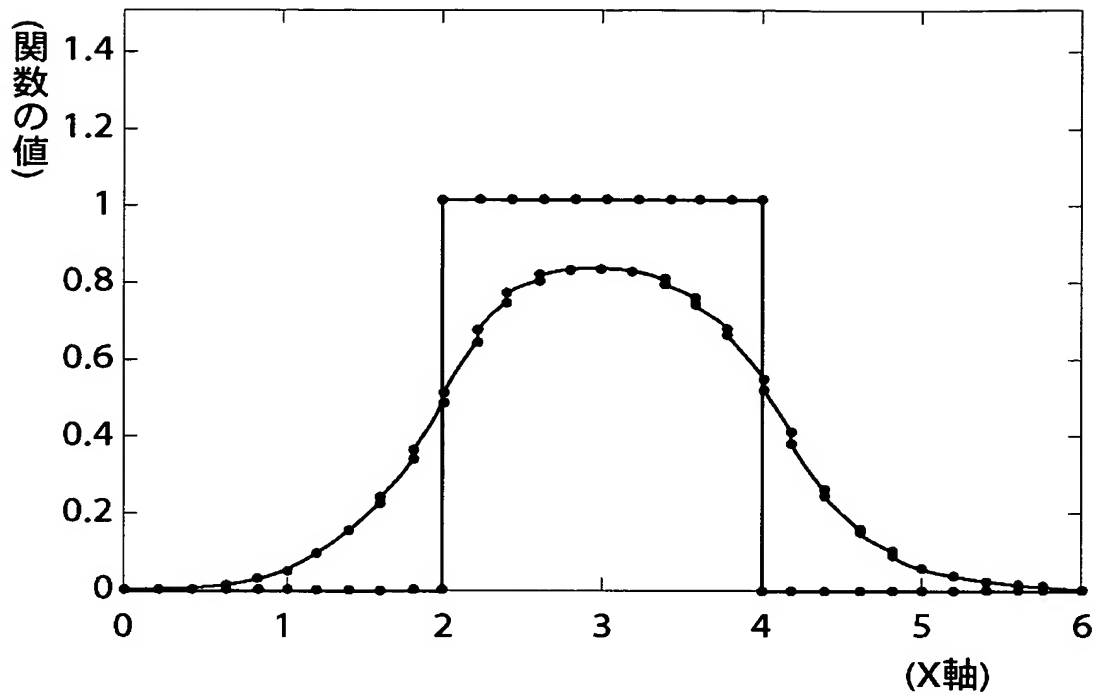
【図 5】



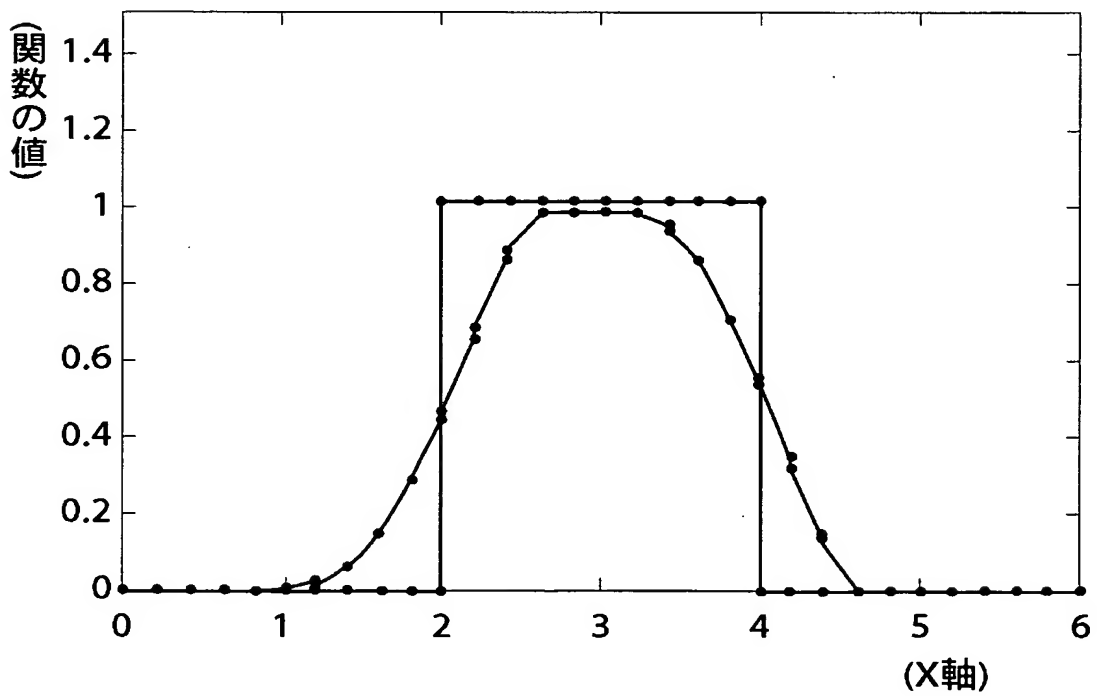
【図 6】



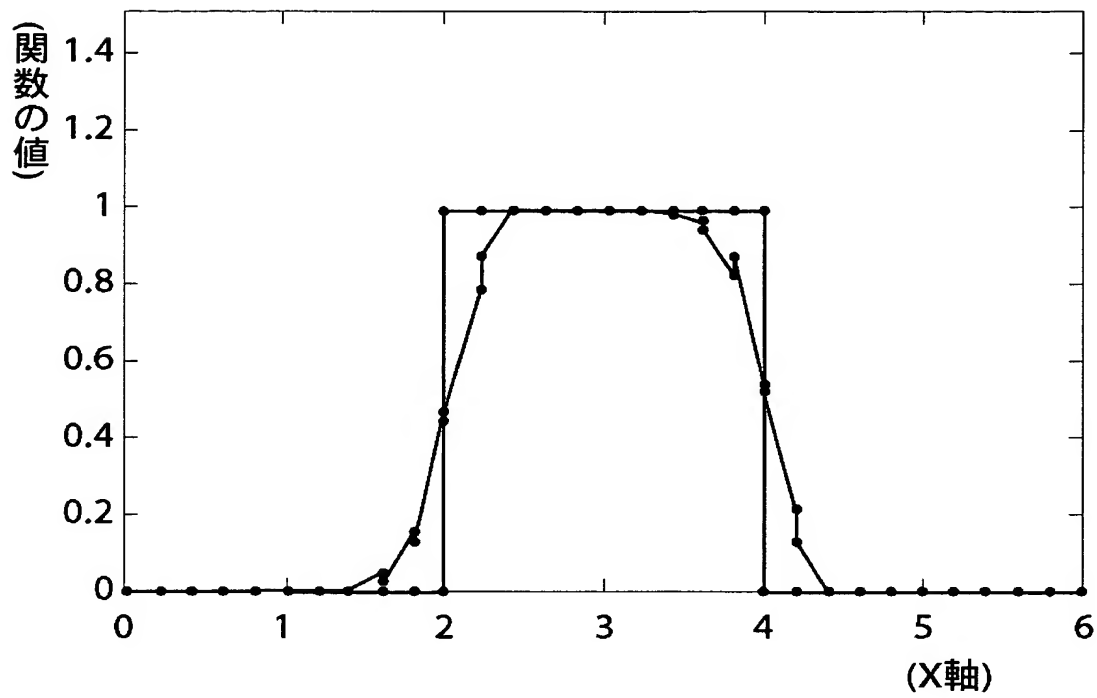
【図 7】



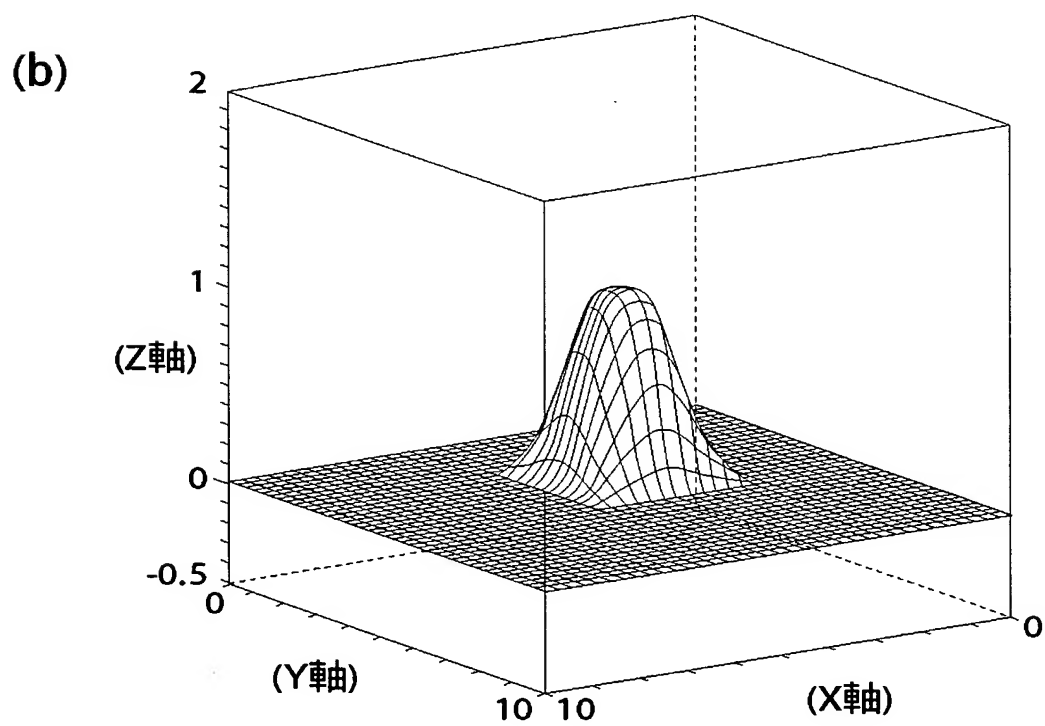
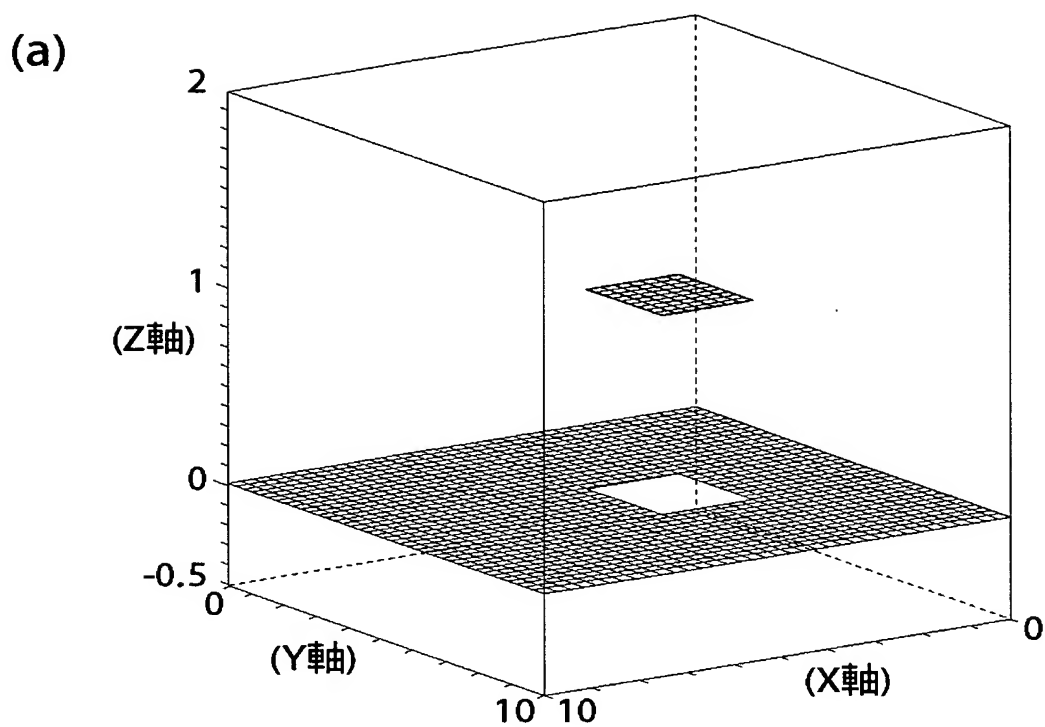
【図 8】



【図 9】



【図 10】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 流体シミュレータの作成に当たって、気液の界面形状をシャープに保ったまま移動計算を行うために、格子点上に離散的に定義された離散関数から実一次元上の（不連続）関数を構成する補間アルゴリズムを提供する。

【解決手段】 1次元実領域上に構成された1次元構造格子と、該1次元構造格子の各胞中心において値が定まる事によって定義される該1次元構造格子上の関数 f とが用意されたとき、該関数 f と該格子の幾何を用いることにより、前記1次元実領域上の関数 F を定義する補間方法において、着目する格子に対して、該格子上の点を前進差分と後進差分の符号が異なるときには傾きをゼロとし、符号が同じ場合は、その絶対値の小さい方の2倍を傾きに選び、中心での値として前記着目する胞の中心の値 f を持ち、該傾きを持つ1次関数によって、該胞で定まる1次元実領域の部分領域上での関数 F の値を定める。

【選択図】 図1

特願 2 0 0 2 - 2 2 3 1 4 5

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 1 0 0 7]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 3 0 日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都大田区下丸子 3 丁目 3 0 番 2 号

氏 名

キヤノン株式会社